

**В.П. КУЗЬМЕНКО**, аспирант НТУУ «КПИ», инженер ООО «ППА Славутич», Киев;

**Н.И. СИРЕНКО**, главный инженер ООО «ППА Славутич», Киев;

**А.П. МОВЧАН**, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»;

## **КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000 ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИУ**

Обсуждаются проблемы контроля и оценки запаса теплоносителя в первом контуре реакторной установки с ВВЭР-1000. Проводится краткий обзор существующих подходов к решению данной задачи и указываются их недостатки. Предлагается применение термоанемометрического метода измерения с использованием термоэлектрических индикаторов уровня типа ТИР-1509.

**Ключевые слова:** ВВЭР-1000, измерение уровня, термоанемометр, термоэлектрический индикатор уровня.

**Введение.** По результатам анализа аварий на ядерных установках (ЯУ) в мире идет постоянное ужесточение требований к системам контроля и диагностики в аварийных режимах. Украина как член МАГАТЭ является непосредственным участником этого процесса. В соответствии с [1] для успешного управления ядерной установкой во время аварий с потерей теплоносителя оператору необходимо иметь в своем распоряжении информацию, по которой можно оценить запас теплоносителя в первом контуре. На реакторных установках с ВВЭР-1000 (РУ), которые эксплуатируются в Украине, не предусмотрены проектные средства контроля уровня теплоносителя в реакторе и системе первого контура.

Высокий уровень ионизирующего излучения в реакторе оказывает разрушительное воздействие на средства измерения. К тому же, накладываются конструктивно-эксплуатационные ограничения на средства измерения, связанные с особенностями конструкции ЯУ.

Известны следующие методы измерения и оценки запаса теплоносителя в первом контуре ЯУ: гидростатический, гидродинамический, томографический, радиационный. Помехи со стороны работающего технологического оборудования, под влияние которых попадают измерительные каналы и бороться с которыми сложно и не всегда удается, вносят дополнительную погрешность в работу этих методов. К недостаткам методов следует так же отнести сложность их наладки и внедрения на АЭС Украины из-за конструктивных особенностей ЯУ.

**Термоанемометрический метод.** Одними из самых адаптируемых к условиям всех режимов работы энергоблока, вплоть до «тяжелых» аварий, являются температурные измерения. Для индикации уровня теплоносителя на определенных отметках реактора предлагается использовать термоэлектри-

ческие индикаторы уровня (ТИУ) типа ТІР-1509 (ТУ У ТУ 33.2-04850451-090:200) производства НПО «Термопрылад», г. Львов. ТИУ был специально разработан для использования в системе контроля уровня теплоносителя (СКУТ) на Украинских АЭС. В основу работы заложен термоанемометрический метод: изменение коэффициента теплоотдачи с поверхности прибора в зависимости от среды (вода, пароводяная смесь, воздух и т.д.), в которой находится индикатор (см. рис. 1).

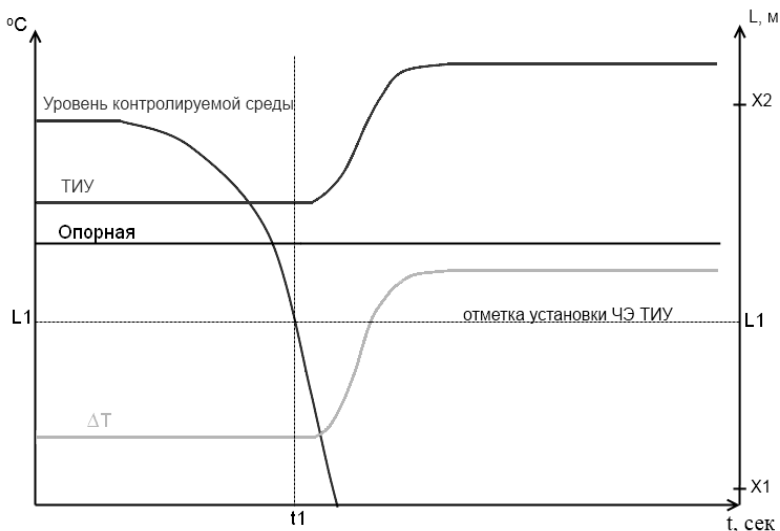


Рис. 1 – Принцип действия ТИУ: опорная – температура контролируемой среды; ТИУ – температура ТИУ;  $\Delta T$  – разница между температурой ТИУ и опорной;  $L1$  – отметка размещения чувствительного элемента ТИУ (ЧЭ ТИУ);  $t1$  – время падения уровня контролируемой среды ниже  $L1$ ;  $X1$ - $X2$  – зона установки, контролируемая ТИУ

Устройство индикатора изображено на рис. 2. ТИУ состоит из двудвоенной термопары типа ТХА-1590 ( $T1$  и  $T2$ ) и нагревательной нити.

Для разработки метода оценки запаса теплоносителя в первом контуре ЯУ с применением ТИУ проведены следующие исследования:

1. получена статическая характеристика нагревателя и изучены возможные режимы нагрева ТИУ;
2. получены и проанализированы динамические характеристики ТИУ;
3. разработан алгоритм определения уровня теплоносителя.

Для испытаний ТИУ был разработан и сертифицирован полнофакторный термодинамический испытательный стенд температурных каналов реактора ВВЭР-1000, 440 (ПТИС). Стенд позволяет создавать основные рабочие параметры теплоносителя первого контура и производить контролируемый набор и сброс воды.

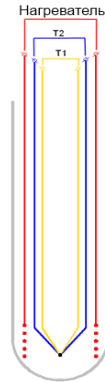


Рис. 2 – Устройство ТИУ:  $T_1$ ,  $T_2$  – термодатчики

Предложено две структуры построения системы контроля ТИУ. Они приведены на рис. 3.

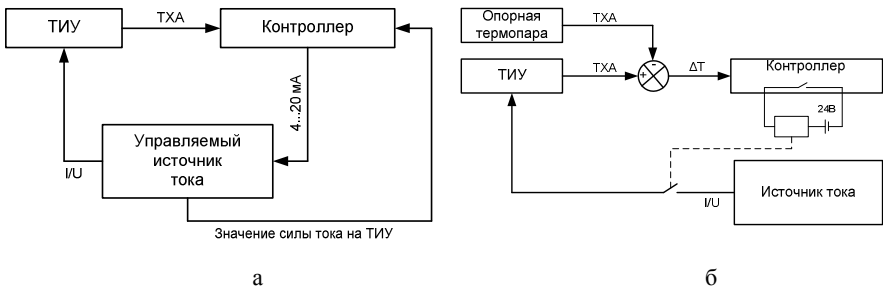


Рис. 3 – Структуры построения системы контроля ТИУ: а – поддержание температуры ТИУ с помощью управляемого источника тока; б – измерение разницы температур теплоносителя и подогреваемого датчика ТИУ

Принцип работы структуры, изображенной на рис. 3, а, заключается в поддержании с помощью управляемого источника тока температуры ТИУ в «мокром» состоянии на, скажем, 30°C выше, чем температура теплоносителя. Если уровень теплоносителя начнет падать и ТИУ охолит, то номинальное значение тока, которое необходимо для его подогрева уменьшится. Анализируя изменение тока можно производить индикацию ТИУ «сухой»-«мокрый».

Принцип работы структуры, изображенной на рис. 3, б, заключается в измерении разницы температур теплоносителя и подогреваемого датчика ТИУ. Источник тока нагреет ТИУ в «мокром» состоянии, к примеру, на 30 °C выше температуры теплоносителя (опорная температура). Если датчик перейдет в состояние «сухой», то температура ТИУ увеличится. Анализируя

динамику изменения разницы температур можно производить индикацию ТИУ «сухой»-«мокрый».

В данной работе предлагается использование структуры, которая изображена на рис. 3, б.

Важным является исследование и выбор режима подогрева ТИУ, поскольку граничное значение температуры нагревателя, при которой сохраняется его работоспособность, – 400 °С. Питание осуществляется от трансформатора, который имеет несколько обмоток с разным коэффициентом трансформации и обеспечивает выходное напряжение от 5 до 60 В с шагом в 5 В. Опытным путем были получены статические характеристики ТИУ в граничных условиях работы: «сухой» при температуре среды 30 °С, «мокрый» при температуре среды 30 °С, «сухой» при температуре среды 320 °С, «мокрый» при температуре среды 320 °С.

Для определения наиболее подходящего режима нагрева ТИУ необходимо учитывать следующие ограничения:

1. Максимальная температура ТИУ – 400 °С.
2. Инерционность определения состояния ТИУ «сухой»-«мокрый» должна составлять не более 50 с [1, 2].
3. Нужно обеспечить оптимальную разность температур между ТИУ и опорной температурой, для достоверного определения работоспособности ТИУ и состояния «сухой»-«мокрый».

Анализируя полученные статические характеристики был сделан вывод о том, что наиболее подходящее напряжение для запитки ТИУ – 30 В.

Разгонные характеристики ТИУ при температуре среды 320 °С и питающем напряжении 30 В в состояниях ТИУ «мокрый» и «сухой» приведены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

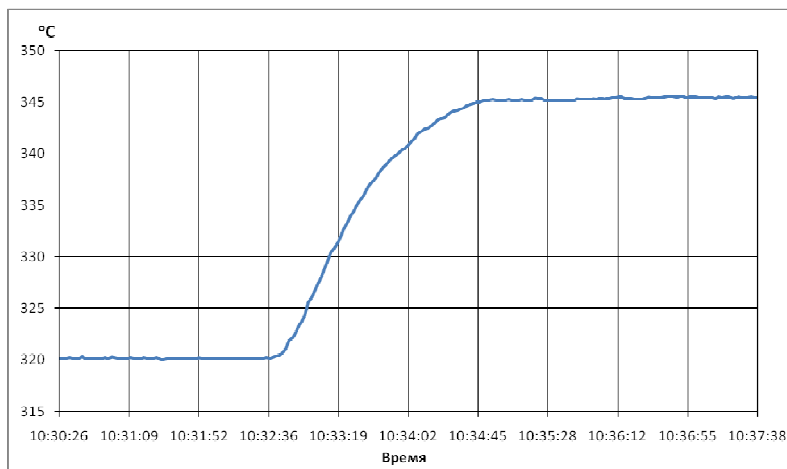


Рис. 4 – Разгонная характеристика ТИУ в состоянии «мокрый»

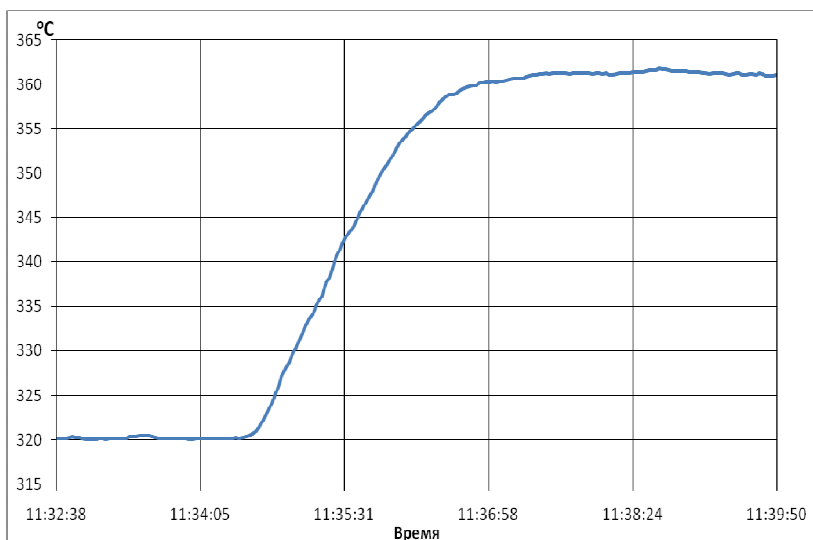


Рис. 5 – Разгонная характеристика ТИУ в состоянии «сухой»

На рис. 6 изображены полученные разгонные характеристики при проведении эксперимента по переводу ТИУ с состояния «мокрый» в состояние «сухой» при температуре среды 320 °С и давлении 16 МПа.

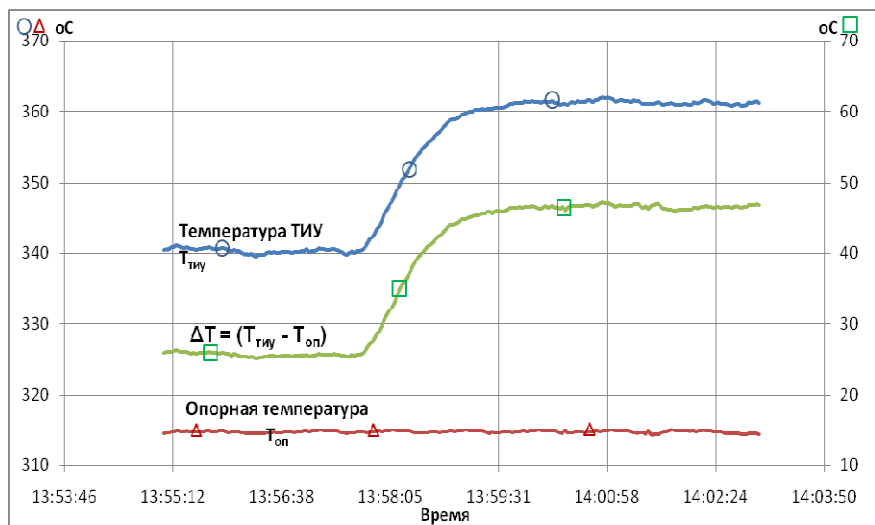


Рис. 6 – Иммитация аварии с потерей теплоносителя

Алгоритм определения работоспособности ТИУ заключается в непрерывном анализе разницы температур  $\Delta T = T_{\text{тиу}} - T_{\text{оп}}$ . Если  $\Delta T$  на протяжении 3 секунд находится близкой либо равной нулю, то это является признаком неработоспособности ТИУ и приводит к формированию соответствующей тревоги.

Алгоритм определения состояния ТИУ «сухой»/«мокрый» заключается в непрерывной проверке условия  $\Delta T \leq T_{\text{уст}}$ .  $T_{\text{уст}}$  – это динамическая уставка срабатывания ТИУ.  $T_{\text{уст}}$  зависит от режима работы энергоблока и является функцией от температуры среды, в которой находится ЧЭ ТИУ:  $T_{\text{уст}} = f(T_{\text{оп}}) + \delta$ . Составляющая  $\delta$  является константой и определяется в результате опытов на термодинамическом стенде имитации температурных каналов реактора ВВЭР-1000. Самым показательным является пуск энергоблока с режима «холодного останова».

Во время вывода энергоблока №1 Южно-Украинской АЭС на мощность, т.е. по время пуска, были сняты тренды изменения  $T_{\text{оп}}$  и  $\Delta T$ . По полученным данным была найдена зависимость  $T_{\text{уст}} = f(T_{\text{оп}})$ , график которой изображен на рис. 7.

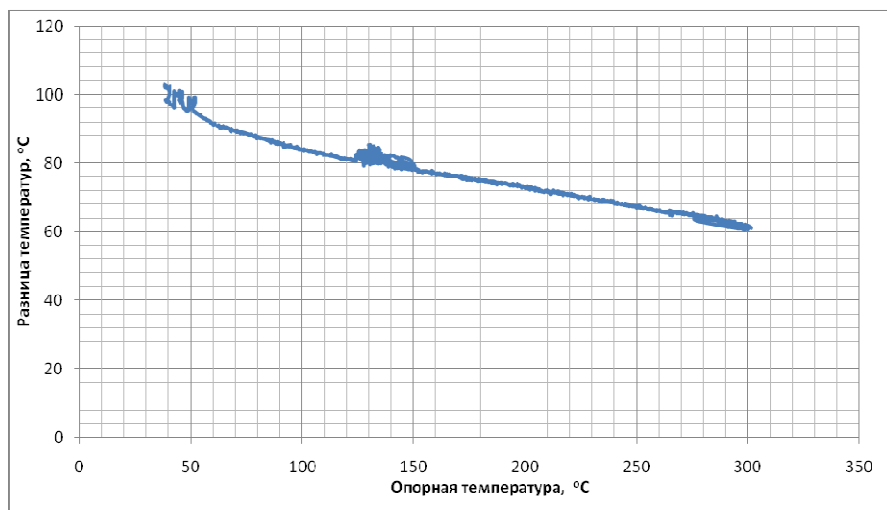


Рис. 7 – Зависимость  $T_{\text{уст}} = f(T_{\text{оп}})$

Полученная зависимость была аппроксимирована методом линейной аппроксимации. В результате была получена формула расчета динамической уставки для определения состояния ТИУ «сухой»-«мокрый»:  
 $T_{\text{уст}} = -0,135 \cdot T_{\text{оп}} + 100,9 + \delta$ .

С учетом ограничений по времени на индикацию падения уровня (50 с) константа  $\delta$  была выбрана равной 12 °С.

Для того чтобы избежать влияния случайных помех со стороны работающего оборудования ЯУ и класса точности ТИУ в алгоритм срабатывания ТИУ был введен дополнительный таймер. Как только разница температур  $\Delta T$  превышает уставку, включается таймер. Решение о срабатывании ТИУ принимается в том случае, если по истечению 4 секунд  $\Delta T$  будет оставаться за пределами уставки.

**Результаты разработок.** В результате проведенных исследований был разработан метод индикации наличия среды на уровне ЧЭ ТИУ. Данный метод был использован как один из методов определения запаса теплоносителя в системе контроля уровня теплоносителя в первом контуре ядерной установки с реактором ВВЭР-1000. СКУТ анализирует состояние десяти ТИУ, которые расположены таким образом, что позволяют контролировать наличие теплоносителя на трех отметках в корпусе реактора (над активной зоной) и в холодных и горячих нитках всех главных циркуляционных контуров ЯУ.

**Выводы.** Температурные индикаторы уровня – один из наиболее надежных инструментов, позволяющий оценивать запас теплоносителя в реакторной установке (РУ) во время протекания аварий сопровождаемых малыми и средними течами. Но на стабильность, скорость и достоверность определения перехода ТИУ из состояния «мокрый» в состояние «сухой» и обратно оказывают некоторое влияние дисбалансы в работе РУ в результате останова одного или нескольких циркуляционных насосов, насыщения пароводяной смеси, изменения направления циркуляции теплоносителя и прочее. В результате возможно как ложное срабатывание индикатора так и аварийное не срабатывание. Ведутся исследования по усовершенствованию и оптимизации алгоритмов работы датчика, с целью повышения надежности его работы.

**Список литературы:** 1. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности. Блок 1 Южно-Украинской АЭС. Итоговый отчет. 23.1.27.ОБ.00. – К.: Министерство энергетики и угольной промышленности Украины ГП НАЭК «Энергоатом» ОП «Южно-Украинская АЭС». 2. АЗЧА СКУТ.01.ТЗ «Система контроля уровня теплоносителя в реакторе и системе первого контура. Техническое задание».

*Надійшла до редколегії 22.10.2012*

УДК 621.039:681.5

**Контроль уровня теплоносителя в реакторе ВВЭР-1000 при тяжелых авариях с использованием ТИУ / В.П. Кузьменко, Н.И. Сиренко А.П., Мовчан // Вісник НТУ «ХПІ».** Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 8 (982). – С. 69–75. Бібліогр.: 2 назв.

Обговорюються проблеми контролю та оцінки запасу теплоносія в першому контурі реакторної установки з ВВЕР-1000. Проводиться короткий огляд існуючих підходів до рішення даної задачі і вказуються їх недоліки. Пропонується використання термоанемометричного методу виміру з використанням термоелектричних індикаторів рівня типу ТІР-1509.

**Ключові слова:** ВВЕР-1000, вимірювання рівня, термоанемометр, термоелектричний індикатор рівня.

Discusses the problems of monitoring and evaluation of the coolant in the first loop of reactor setting with WVER-1000. Provides a brief review of existing approaches to solving this problems and discusses their shortcomings. Suggests the use of thermo-anemometer measurement method using thermoelectric level indicators TIP-1509.

**Keywords:** WVER-1000, level measurement, thermo-anemometer, thermocouple indicator.